

УДК 662.6

Оптимизация параметров процесса получения биотоплива методами математического моделирования*

Канд. техн. наук Л. Н. ФРОЛОВА¹, д-р техн. наук В. Н. ВАСИЛЕНКО²,
канд. техн. наук М. В. КОПЫЛОВ³, канд. техн. наук А. А. ДЕРКАНОСОВА⁴,
Н. А. МИХАЙЛОВА

¹f1n-84@mail.ru, ²vvn_1977@mail.ru, ³f1n-84@mail.ru, ⁴aa-derk@yandex.ru
Воронежский государственный университет инженерных технологий
394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19

*Статья подготовлена в рамках Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — докторов наук (№ МД-1246.2014.4).

С целью определения рациональных параметров процесса получения биотоплива из рапсового масла были проведены исследования в соответствии с рототабельным методом планирования эксперимента, позволяющим получить наиболее точное математическое описание процессов. Задача оптимизации процесса получения биотоплива с использованием рапсового масла заключалась в поиске условий, при которых выход готового продукта — максимальный, при сбалансированном содержании катализатора (KOH) и метилового спирта (CH₃OH) в биотопливе. Получены оптимальные интервалы входных параметров: содержание катализатора KOH составляет 1,719% от общей массы готового продукта, содержание метилового спирта — 16,189% от общей массы готового продукта. Для осуществления реакции переэтерификации необходимо поддерживать температуру смеси 58,92 град. С. В результате многофакторного статистического анализа процесса получения биотоплива выведено регрессионное уравнение, анализ которого позволяет выделить факторы, наиболее влияющие на рассматриваемый процесс получения биотоплива из рапсового масла.

Ключевые слова: биотопливо, рапсовое масло, энергосбережение, статистический анализ.

Optimization of parameters of process of receiving biofuel by methods of mathematical modeling

Ph. D. L. N. FROLOVA¹, D. Sc. V. N. VASILENKO²,
Ph. D. M. V. KOPYLOV³, Ph. D. A. A. DERKANOSOVA⁴,
N. A. MIKHAILOVA

¹f1n-84@mail.ru, ²vvn_1977@mail.ru, ³f1n-84@mail.ru, ⁴aa-derk@yandex.ru
Voronezh State University of Engineering Technologies
394036, Russia, Voronezh, avenue Revolyutsii, 19

In order to determine the rational parameters of biofuel from rapeseed oil studies were conducted in accordance with the method rototabelnym experimental design, provides the most accurate mathematical description of the processes. The problem of optimizing process biofuel using rapeseed oil was to find conditions under which the yield of the final product — the maximum, with a balanced content of the catalyst (KOH) and methyl alcohol (CH₃OH) in biofuel. Optimum intervals of input parameters are received: the maintenance of the catalyst makes 1,719% of the lump of a ready-made product, the content of methyl alcohol — 16,189% of the lump of a ready-made product. For implementation reaction of a pereeterifikation it is necessary to maintain temperature of mix of 58,92 deg C. As a result of multivariate statistical analysis of the process of producing biofuels was obtained regression equation, analysis of which allows you to identify the factors most influencing the reporting process of obtaining biofuels from rapeseed oil.

Keywords: biofuel, rapeseed oil, energy, statistical analysis.

Биодизель и его производство — одно из самых перспективных и выгодных направлений для малого бизнеса, которое позволяет получать высокие прибыли от реализации, при этом сохраняется благоприятная экологическая среда. Цикл производства практически безотходный, сырье может выращиваться на используемых землях. После производства биотоплива остается жмых, который используют в качестве корма для животных и глицериновая фаза, которая при очистке превращается в чистый глицерин.

Для получения биодизеля используют любые виды растительных масел — подсолнечное, рапсовое, льняное и т. д. Рапсовое масло обладает относительно высокой стойкостью к окислению. Содержание йода (IV) в нем ниже, чем 120 ед., и, несмотря на то, что рапсовый биодизель несколько уступает пальмовому по калорийности, он лучше переносит холод, потому более всего подходит для европейских стран и России.

С целью определения рациональных параметров процесса получения биотоплива из рапсового масла были

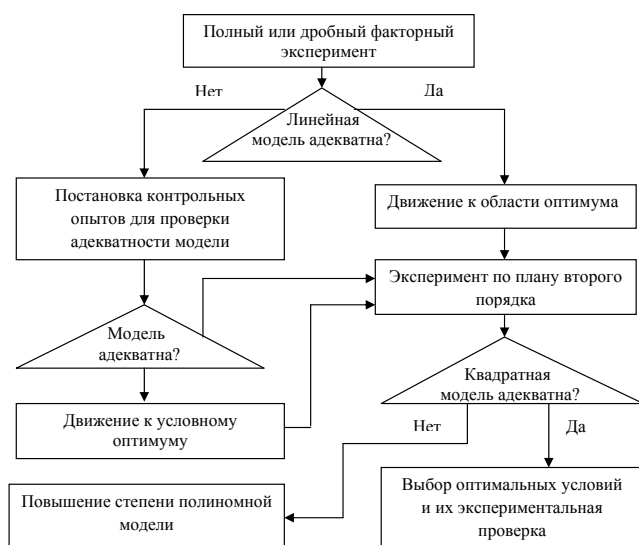


Рис. 1 Структурная схема экспериментальных исследований с целью оптимизации процесса получения биотоплива

проведены исследования в соответствии с ротатбельным методом планирования эксперимента, позволяющим получить наиболее точное математическое описание процессов.

В соответствии с идеей шагового поиска, эксперимент проводился в несколько этапов. Число этапов и действия на каждом из них зависели от результатов предыдущего этапа и конечной цели исследований. Конечной целью исследования является определение оптимальных условий протекания процесса (рис. 1).

В качестве основных факторов были выбраны: X_1 — содержание метилового спирта (CH_3OH), % к массе полученной смеси; X_2 — содержание катализатора (KOH), % к массе полученной смеси; X_3 — температура, при которой проводились экспериментальные исследования, °C. Выбранные факторы совместимы и некоррелируемы между собой.

В табл. 1 приведены основные характеристики плана эксперимента. Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 2. Общее число опытов $N = 18$, число опытов в центре плана $N_0 = 6$, число факторов $k = 3$, плечо «звёздной» точки $r = 1,682$.

Таблица 1

Основные характеристики плана эксперимента

Условия планирования	Пределы изменения факторов		
	X_1	X_2	X_3
Нулевой уровень (0)	15	1,6	50
Интервал варьирования	2,378	0,238	17,84
Верхний уровень (+1)	16,189	1,719	58,92
Нижний уровень (-1)	13,811	1,481	41,08
Верхняя «звездная» точка (+1,682)	17	1,8	65
Нижняя «звездная» точка (-1,682)	13	1,4	35

В качестве функции отклика выбрано Y_1 — выход готового продукта (биотоплива).

Исследования проводили следующим образом. Метиловый спирт смешивали с рапсовым маслом. Процесс смешивания проводили в реакторе с мешалкой. Для того чтобы происходила реакция этерификации смесь нагревали в диапазоне от 35 до 65 °C.

Сначала в реактор заливают рапсовое масло, а затем метиловый спирт (от 13 до 17% от общей массы смеси) смешанный с катализатором KOH (от 1,4 до 1,8% от общей массы смеси).

Для интенсификации перемешивания рапсового масла, метилового спирта и катализатора использовали мешалку. К окончанию проведения реакции мешалку отключали для более эффективного отделения глицерина.

Результаты экспериментальных исследований по получению биотоплива см. в табл. 2.

Для обработки экспериментальных исследований использовали программный комплекс STATISTICA 10.

Для получения уравнения регрессии матричные данные были обработаны при помощи программного комплекса SGWIN.

Уравнение регрессии в физических переменных после удаления незначимых коэффициентов имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & -115,569 + 10,8466 \cdot x_1 + 136,281 \cdot x_2 + \\
 & + 0,361345 \cdot x_3 - 0,439466 \cdot x_1^2 + \\
 & + 1,06014 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0235718 \cdot x_1 \cdot x_3 - \\
 & - 47,6563 \cdot x_2^2 + 0,11776 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,00847701 \cdot x_3^2 .
 \end{aligned}$$

Из рис. 2–4 видно, что для получения биотоплива необходимо использование катализатора KOH в диапазоне 1,6–1,75% от общей массы готового продукта, при этом метиловый спирт следует добавлять в диапазоне 15–16,5% от общей массы готового продукта. В свою очередь для того чтобы проходила реакция переэтерификации необходимо поддерживать температуру смеси в диапазоне 50–60 °C.

Для наглядного представления, рис. 2–4 были интерпретированы в кривые выхода готового продукта в зависимости от содержащихся в нем компонентов (рис. 5). Из рис. 5 видно, что при постоянной оптимальной температуре (в данном случае $T_{\text{const}} = 59$ °C), выход готового продукта максимальный при содержании катализатора (KOH) 1,6–1,75%, при этом самым оптимальным является содержание метилового спирта в диапазоне 15–16,5% от общей массы готового продукта.

Учитывая, что исследуемые факторы (содержание катализатора (KOH) и метилового спирта (CH_3OH)) неоднозначно влияют на выход готового продукта, был проведен выбор оптимальных условий процесса методом Харрингтона.

Задача оптимизации процесса получения биотоплива с использованием рапсового масла заключалась в поиске условий, при которых выход готового продукта — максимальный, при сбалансированном содержании катализатора (KOH) и метилового спирта (CH_3OH) в биотопливе.

Для оптимизации процесса величины выходных параметров преобразованы в безразмерную шкалу желательности d (d_1 — выход готового продукта).

Таблица 2

Матрица планирования и результаты экспериментальных исследований процесса получения биоэтанола

№ п/п	Изменяемые параметры						Выходные параметры	
	кодированные			физические			экспериментальные	расчетные
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	Выход готового продукта, %	Выход готового продукта, %
1	-1	-1	-1	13,811	1,481	41,08	90,40	90,47
2	-1	-1	1	13,811	1,481	58,92	90,60	90,72
3	-1	1	-1	13,811	1,719	41,08	91,20	91,25
4	-1	1	1	13,811	1,719	58,92	92,80	91,99
5	1	-1	-1	16,189	1,481	41,08	91,50	90,95
6	1	-1	1	16,189	1,481	58,92	93,60	92,19
7	1	1	-1	16,189	1,719	41,08	93,80	92,33
8	1	1	1	16,189	1,719	58,92	95,50	94,07
9	-1,682	0	0	13	1,6	50	91,20	90,88
10	1,682	0	0	17	1,6	50	90,80	93,03
11	0	-1,682	0	15	1,4	50	90,30	90,70
12	0	1,682	0	15	1,8	50	91,40	92,93
13	0	0	-1,682	15	1,6	35	90,50	90,98
14	0	0	1,682	15	1,6	65	91,20	92,64
15	0	0	0	15	1,6	50	93,80	93,72
16	0	0	0	15	1,6	50	93,80	93,72
17	0	0	0	15	1,6	50	93,80	93,72
18	0	0	0	15	1,6	50	93,80	93,72

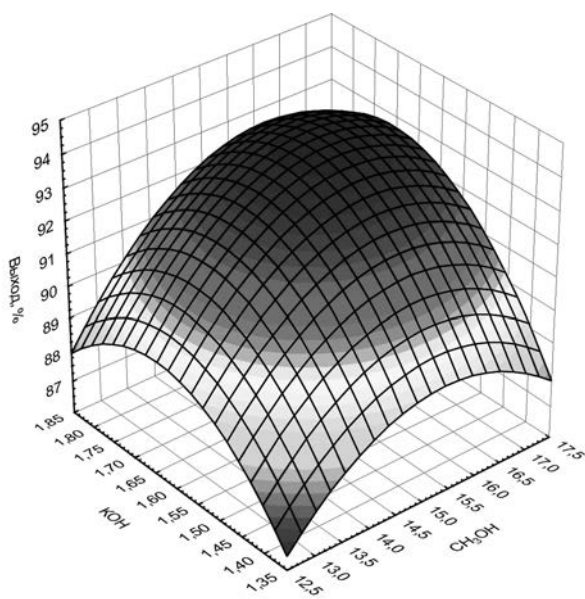


Рис. 2. Влияние добавляемого катализатора (KOH) и метилового спирта (CH₃OH) на выход готового продукта

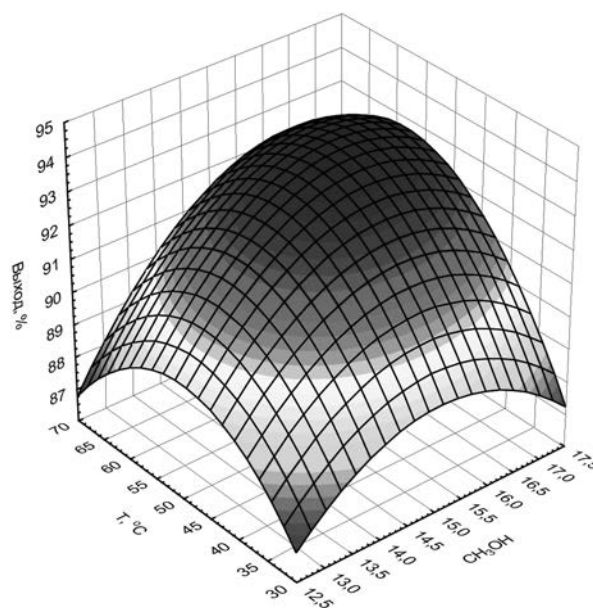


Рис. 3. Влияние температуры нагрева (T) и добавляемого метилового спирта (CH₃OH) на выход готового продукта

Оптимальному сочетанию исследуемых факторов соответствует максимальная величина обобщенной функции желательности D .

Согласно формуле:

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ik} x_i x_k + \sum b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

где b_0 — свободный член уравнения, равный средней величине отклика при условии, что рассматриваемые

факторы находятся на средних, «нулевых» уровнях; i, k — индексы факторов; b_i — коэффициенты при линейных членах; b_{ik} — коэффициенты двухфакторных взаимодействий, показывающие, насколько изменяется степень влияния одного фактора при изменении величины другого; b_{ii} — коэффициенты квадратичных эффектов, определяющие нелинейность выходного параметра от рассматриваемых факторов.

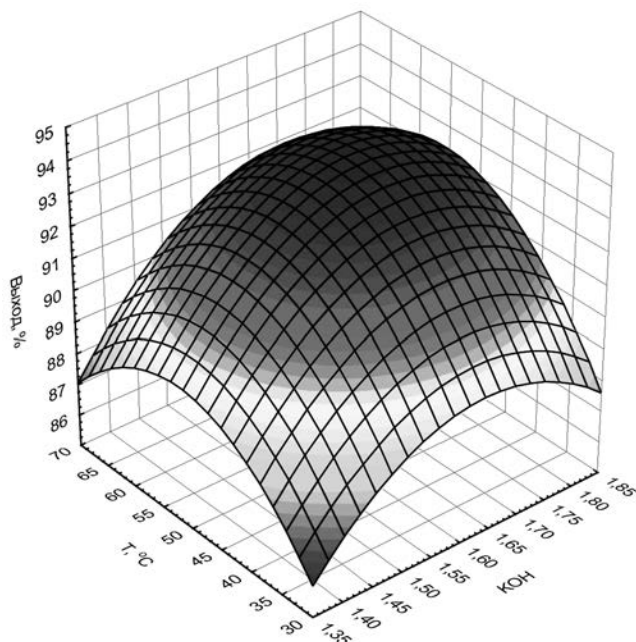


Рис. 4. Влияние температуры нагрева (Т) и добавляемого катализатора (KOH) на выход готового продукта

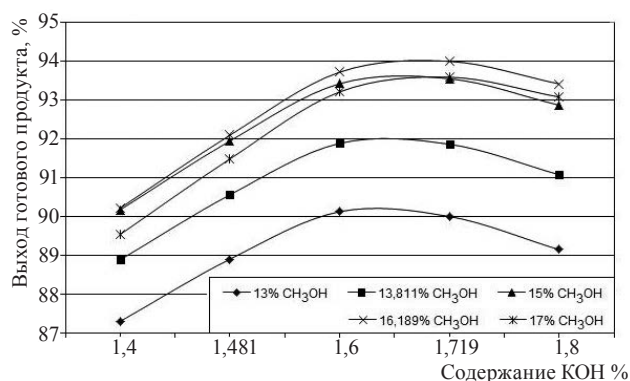


Рис. 5. Выход готового продукта (биотоплива) в зависимости от содержания катализатора (KOH) и метилового спирта (CH_3OH)

Система уравнений для определения b_0 и b_1 для выхода готового продукта примет вид:

$$1,51 = b_0 + 94,07b_1;$$

$$-0,46 = b_0 + 90,47b_1,$$

где 94,07 — лучшее значение для Y_1 (%); 90,47 — худшее значение для Y_1 (%).

Отсюда $b_0 = -49,967$ и $b_1 = 0,547$.

В нашем случае имеют место односторонние ограничения на выходные параметры вида $Y \leq Y_{\max}$ или $Y \geq Y_{\min}$. Приемлемой формой преобразования Y в d служит экспоненциальная зависимость:

$$d = \exp[-\exp(Y')], \quad (2)$$

где $Y' = b_0 + b_1Y$.

Частные функции имеют вид:

$$d_1 = \exp[-\exp(-49,967 + 0,547Y_1)]. \quad (3)$$

Значения частных функций желательности для всех точек плана, определенные по этим формулам, приведены в табл. 3.

Значения частных функций и обобщенной функции желательности каждого опыта

Номер опыта	X_1	X_2	X_3	d_1	D
1	-1	-1	-1	0,20514	0,205
2	-1	-1	1	0,25120	0,251
3	-1	1	-1	0,35568	0,356
4	-1	1	1	0,50182	0,502
5	1	-1	-1	0,29578	0,296
6	1	-1	1	0,53901	0,539
7	1	1	-1	0,56414	0,564
8	1	1	1	0,80179	0,802
9	-1,682	0	0	0,28204	0,282
10	1,682	0	0	0,67687	0,677
11	0	-1,682	0	0,24740	0,247
12	0	1,682	0	0,66217	0,662
13	0	0	-1,682	0,30170	0,302
14	0	0	1,682	0,61685	0,617
15	0	0	0	0,76526	0,765
16	0	0	0	0,76526	0,765
17	0	0	0	0,76526	0,765
18	0	0	0	0,76526	0,765

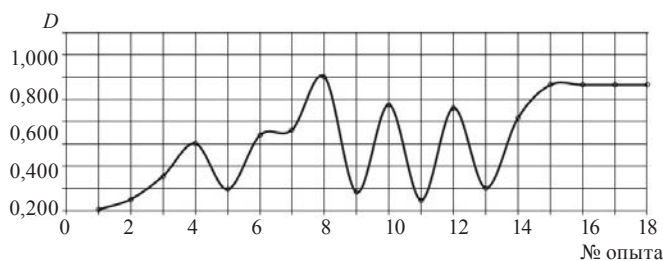


Рис. 6. Обобщенная функция желательности

Наглядное представление значений обобщенной функции желательности показано на рис. 6.

Обобщенная функция желательности D имеет максимальное значение в опыте 8 и составляет 0,802.

В результате многофакторного статистического анализа процесса прессования можно сделать выводы:

1. Было получено регрессионное уравнение, анализ которого позволяет выделить факторы, наиболее влияющие на рассматриваемый процесс получения биотоплива из рапсового масла.

2. Впервые решена задача оптимизации нахождения диапазона изменения входных параметров процесса получения биотоплива для получения максимального выхода готового продукта.

3. В результате решения задачи с векторным критерием оптимизации были получены оптимальные интервалы входных параметров: содержание катализатора KOH в диапазоне 1,719% от общей массы готового продукта, при этом содержание метилового спирта следует добавлять 16,189% от общей массы готового продукта. В свою очередь для того чтобы проходила реакция переэтерификации необходимо поддерживать температуру смеси в районе 58,92 °C.

В процессе исследований предполагается разработка энергосберегающей технологии, как системы процессов, которую планируется довести до уровня, обеспечивающего возможность организации промышленного производства, и соответствующего тенденциям развития мирового рынка энергосберегающего оборудования по производству биодизельного топлива и мировому качеству выпускаемого биодизеля.

Список литературы

1. *Василенко, В. Н.* Разработка теоретических и технологических основ комплексной переработки масличного сырья [Текст]: монография / В. Н. Василенко, Л. Н. Фролова, И. В. Драган. — Воронеж: ВГУИТ, 2014. 148 с.
2. Новое в технологии купажирования растительных масел [Текст]: монография / А. Н. Остриков, В. Н. Василенко, Л. Н. Фролова, М. В. Копылов. — Воронеж: ВГУИТ, 2013. 225 с.
3. Энерго- и ресурсосберегающие технологии переработки масличных культур [Текст]: учебное пособие / В. Н. Василенко, Л. Н. Фролова, И. В. Драган. — Воронеж, 2015. 172 с.
4. Процессы и аппараты пищевых производств. Учебник для вузов [Текст] / Остриков А. Н., Абрамов О. В., Логинов А. В., Красовитский Ю. В. — СПб.: ГИОРД, 2012. 616 с.
5. Производство и применение биодизеля: справочное пособие / А. Р. Аблаев и др. — М.: АПК и ППРО, 2006. 80 с.
6. *Смирнова Т. Н., Подгаецкий В. М.* Биодизель — альтернативное топливо для дизелей. Получение. Характеристики. Применение. Стоимость // Двигатель. 2007. № 2 (50).
7. *Шевцов А. А., Фролова Л. Н., Василенко В. Н., Драган И. В.* Автоматическая оптимизация процесса прессования семян масличных культур по технико-экономическому показателю. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 3 (61). С. 18–22.
8. *Tyson K. S., McCormick R. L.* 2006 Biodiesel handling and use guide. 3rd ed. — U. S. Dept. of Energy, 2006. 69 p.
9. *Knothe G.* Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters // Fuel Processing Technology. 2005. Vol. 86. P. 1059–1070.
10. *Danini M.* Producing biodiesel a simple affair? A practical guide to read before building your plant. — Damalist n.v., Ghent, Belgium, 2003.
11. Остриков А. Н., Шевцов С. А, Куцов С. В. Исследование кинетики процесса сушки пищевого растительного сырья при активных гидродинамических режимах и разработка

методики инженерного расчета сушилки // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 1 (63). С. 42–50.

12. Biodiesel: making and selling the fuel of the future-business management for producers and producers and biofuel basics (book and CD-ROM set) (Ring-bound). — Progressive Management, 2006. 202 p.

References

1. Vasilenko, V. N. Development of theoretical and technological bases of complex processing of olive raw materials [Text]: monograph / V. N. Vasilenko, L. N. Frolova, I. V. Dragan. — Voronezh: VGUIT, 2014. 148 p. (in Russian)
2. New in technology of blending of vegetable oils [Text]: monograph / A. N. Ostrikov, V. N. Vasilenko, L. N. Frolova, M. V. Kopylov. — Voronezh: VGUIT, 2013. 225 p. (in Russian)
3. The power — and resource-saving technologies of processing of oil-bearing crops [Text]: manual / V. N. Vasilenko, L. N. Frolova, I. V. Dragan. — Voronezh, 2015. 172 p. (in Russian)
4. Processes and devices of food productions. Textbook [Text]. / Ostrikov A. N., Abramov O. V., Loginov A. V., Krasovitskii Yu. V. — Petersburg, 2012. 616 p. (in Russian)
5. Production and use of the biodiesel: handbook / A. R. Ablayev, etc. — Moscow, 2006. 80 p. (in Russian)
6. Smirnova T. N., Podgaetskii V. M. The biodiesel — alternative fuel for diesels. Receiving. Characteristics. Application. Cost. *Dvigatel'*. 2007. No 2 (50). (in Russian)
7. Shevtsov A. A., Frolova L. N., Vasilenko V. N., Dragan I. V. Automatic optimization of process of pressing of seeds of oil-bearing crops on a technical and economic indicator. *Vestnik VGUIT*. 2014. No 3 (61). p. 18–22. (in Russian)
8. Tyson K. S., McCormick R. L. 2006 Biodiesel handling and use guide. 3rd ed. — U. S. Dept. of Energy, 2006. 69 p.
9. Knothe G. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters // Fuel Processing Technology. 2005. Vol. 86. P. 1059–1070.
10. Danini M. Producing biodiesel a simple affair? A practical guide to read before building your plant. — Damalist n.v., Ghent, Belgium, 2003.
11. Ostrikov A. N., Shevtsov S. A, Kutsov S. V. Research of kinetics of process of drying of food vegetable raw materials at the active hydrodynamic modes and development of a technique of engineering calculation of the dryer. *Vestnik VGUIT*. 2015. No 1 (63). p. 42–50. (in Russian)
12. Biodiesel: making and selling the fuel of the future-business management for producers and producers and biofuel basics (book and CD-ROM set) (Ring-bound). — Progressive Management, 2006. 202 p.

Статья поступила в редакцию 10.06.2015